УДК 536.21+692.2:691.327.666.973.2.666.64-492.3

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ТЕПЛОПЕРЕНОС В НЕОДНОРОДНОЙ КЕРАМЗИТОБЕТОННОЙ СТЕНЕ

А.Н. Хуторной, А.Я. Кузин, Н.А. Цветков, Т.А. Мирошниченко, А.В. Колесникова

Томский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: kaftgs@tsuab.ru

С помощью математического моделирования исследовано тепловое состояние неоднородного трехслойного керамзитобетонного фрагмента стены с фасадным утеплением на гибкой связи. Установлен характер распределения полей температуры в керамзитобетонной конструкции. Выполнена оценка зоны влияния гибкой связи на температурное поле стены. Разработанная численная методика позволяет проводить тепловую экспресс-диагностику наружных неоднородных керамзитобетонных стен с различными теплофизическими и геометрическими характеристиками материалов системы в реальных условиях эксплуатации.

Вопросы энергосбережения относятся к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации. Очевидно, что решение этих вопросов должно иметь комплексный характер. В работе [1] выполнена оценка энергоэффективности комплекса энергосберегающих мероприятий в нескольких зданиях общественного назначения г. Москвы. Суммарная экономия энергии оказалась весьма значительной (56...63 %), при этом доля утепления несветопрозрачных ограждений составила 16...20 %. Там же [1] подчеркнута важность энергосберегающих мероприятий, связанных с утеплением несветопрозрачных ограждений, как обеспечивающих суммарное снижение энергопотребления здания не менее чем в 2 раза. В этой связи разработка способов повышения теплоэффективности наружных стен существующих зданий и разработка новых конструкций с повышенными теплозащитными свойствами является объективной необходимостью.

Повысить уровень теплозащиты наружных стен зданий можно за счет устройства в толще конструкции пустот, заполненных эффективным утеплителем [2]. Однако, как показано в работе [3], для ряда климатических зон такое решение может быть не достаточным. С целью обеспечения требованиям СНиП II-3-79* «Строительная теплотехника» возникает необходимость в устройстве дополнительного утепления ограждающих конструкций, которое может быть реализовано с помощью фасадных систем утепления на гибких связях.

Физико-математическая постановка задачи. Рассмотрим нестационарный теплоперенос через трехслойную неоднородную конструкцию, состоящую из керамзитобетона – 1 с вертикальной пустотой, заполненной утеплителем – 4, утеплителя фасадной системы утепления – 2 и обшивки – 3 (рис. 1). Керамзитобетон с обшивкой соединены гибкой связью (коннектором) – 5. Форма керамзитобетона, внутреннего утеплителя, коннектора, утеплителя фасадной системы утепления и обшивки – прямые параллелепипеды, поперечные и продольные сечения которых в общем случае представляют собой разносторонние прямоугольники. Известны теплофизические характеристики (λ_i, ρ_i, c_i, $i=\overline{1,5}$) материалов системы, ее геометрические размеры, температуры наружной ($t_{g,e}$) и внутренней ($t_{g,ins}$) сред, коэффициенты теплоотдачи на наружной (α_w) и внутренней (α_0) поверхностях ограждения [4].

Необходимо рассчитать поля температур и плотностей тепловых потоков в сечениях неоднородной керамзитобетонной стены с фасадным утеплением.

Теплоперенос в неоднородном керамзитобетонном фрагменте стены описывается в декартовой системе координат трехмерными нелинейными нестационарными уравнениями теплопроводности

$$(\rho c)_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{x,i} \frac{\partial t_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_{y,i} \frac{\partial t_i}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_{z,i} \frac{\partial t_i}{\partial z}), \quad i = \overline{1,5}. \qquad (1)$$

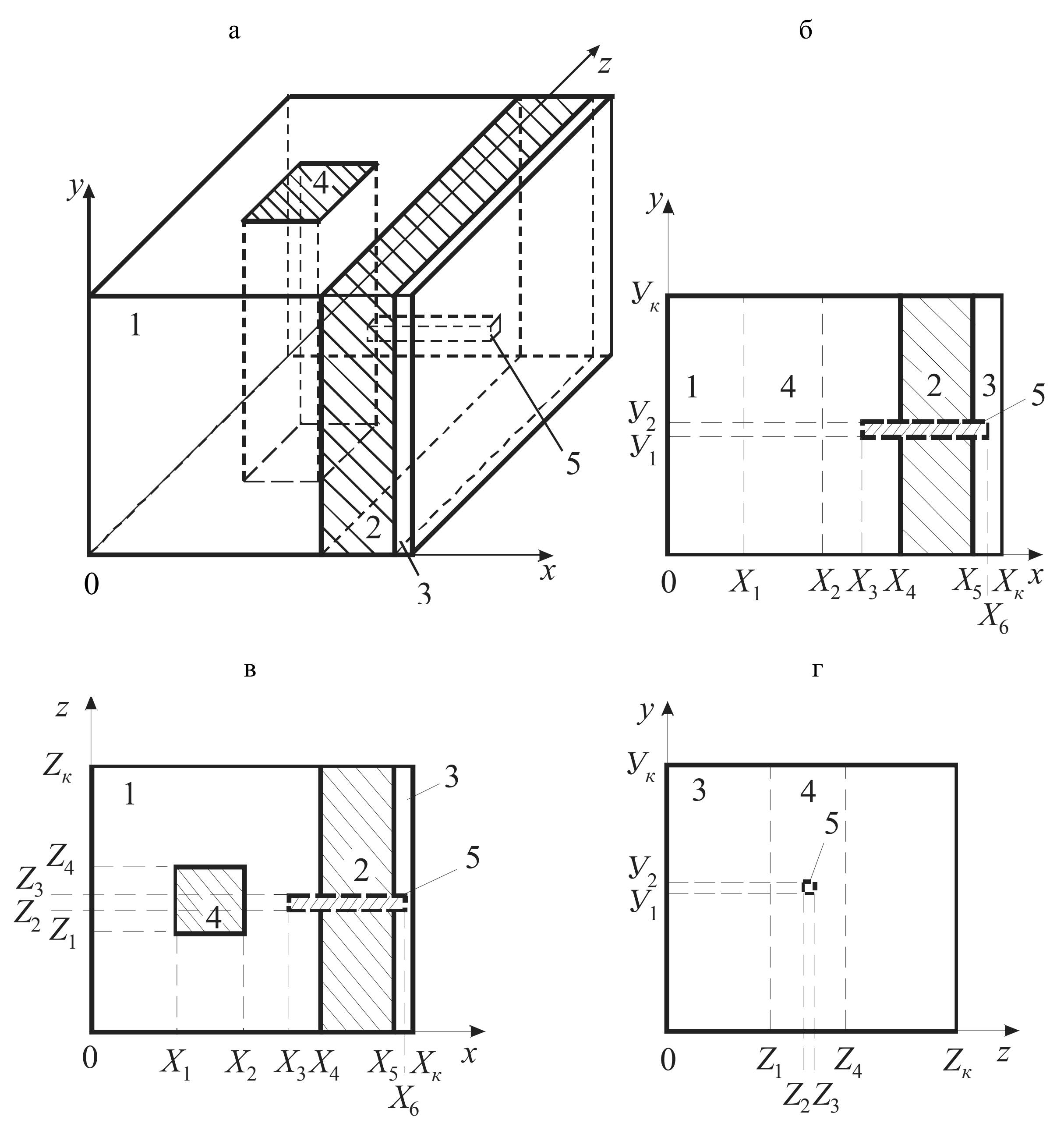


Рис. 1. *Схема неоднородного фрагмента керамзитобетонной стены: 1) керамзитобетон; 2) утеплитель фасадной системы утепления; 3) обшивка; 4) внутренний утеплитель; 5) коннектор; а) общий вид фрагмента; б–г) виды фрагмента сбоку (б, г) и сверху (в)*

Система уравнений (1) замыкается начальными и граничными условиями:

$$t_i\big|_{\tau=0} = t_{in}(x,y,z), \quad i=\overline{1,5},$$
$$x,y,z \in \{0 \le x \le X_к, 0 \le y \le Y_к, 0 \le z \le Z_к\}; \qquad (2)$$

$$-\lambda_{x,1}\frac{\partial t_1}{\partial x}\Big|_{x=0} = \alpha_0(t_{g,ins} - t_0),$$
$$y,z \in \{0 \le y \le Y_к, 0 \le z \le Z_к\}; \qquad (3)$$

$$\lambda_{x,3}\frac{\partial t_3}{\partial x}\Big|_{x=X_к} = \alpha_w(t_{g,e} - t_w),$$
$$y,z \in \{0 \le y \le Y_к, 0 \le z \le Z_к\}, \qquad (4)$$

где t_{in} – температура в начальный момент времени, °С; t_0, t_w – температуры на внутренней и наружной поверхностях стены, °С; τ – время, с; x, y, z – координаты, м; c – коэффициент удельной теплоемкости, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м^3; $X_к$, $Y_к$, $Z_к$, – координаты верхних границ расчетной области по x, y и z, м.

На внешних границах расчетной области D $\{0\le x\le X_к, 0\le y\le Y_к, 0\le z\le Z_к\}$ при $x=X_0$ и $x=X_к$ используются граничные условия третьего рода (3), (4); при $y=0$, $y=Y_к$ и $z=0$, $z=Z_к$ заданы условия симметрии. На внутренних плоскостях расчетной области в местах стыка фрагментов из различных материалов использовались граничные условия четвертого рода.

Метод решения и результаты численных расчетов. Для численной реализации математической модели использовался метод расщепления [5]. Полученные в результате расщепления одномерные уравнения теплопроводности в однослойных и многослойных областях по соответствующим направлениям x, y, z рассчитывались эффективным итерационно-интерполяционным методом [6] с итерациями по коэффициентам с заданной точностью.

Численное решение задачи по вышеизложенному алгоритму осуществлялось с помощью программы, разработанной по модульному принципу на языке программирования ФОРТРАН. Тестирование отдельных программных модулей осуществлялось на известных аналитических решениях [7]. Расчетные шаги по пространству в направлениях x, y, z в общем случае брались переменными из-за большого различия в теплофизических характеристиках материалов слоев стены и коннектора. Решение задачи проверялось на сгущающихся сетках по пространству и времени. Число узлов разностной сетки по x, y, z принималось 89, 127 и 157, а шаг по времени – 50 мин. Время расчета базового варианта до конечного момента времени $\tau_к$=170 ч составило около 30 мин на ПЭВМ Pentium-4. Предполагалось, что теплофизические характеристики материалов фрагмента изотропны. В качестве начального профиля использовалось стационарное аналитическое решение для трехслойного однородного наружного ограждения без утеплителя в керамзитобетоне и коннектора. Исходная и расчетная температуры берутся в °С.

Для оценки теплозащитной эффективности неоднородного фрагмента и проверки корректности расчетов определялись нестационарные тепловые потоки через открытые внутреннюю Q_0 (со стороны помещения) и внешнюю Q_w (со стороны наружного воздуха) поверхности фрагмента по формулам

$$Q_0 = \int_0^{Y_к}\int_0^{Z_к} q(0,y,z)dy\,dz, \quad Q_w = \int_0^{Y_к}\int_0^{Z_к} q(X_к,y,z)dy\,dz,$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м^2.

В базовом варианте расчета использовались следующие исходные данные: λ_1=0,9 Вт/(м·K), ρ_1=1800 кг/м^3, c_1=840 Дж/(кг·K), λ_2=0,05 Вт/(м·K), ρ_2=80 кг/м^3, c_2=1470 Дж/(кг·K), λ_3=0,55 Вт/(м·K), ρ_3=1350 кг/м^3, c_3=1062 Дж/(кг·K), λ_4=0,05 Вт/(м·K), ρ_4=80 кг/м^3, c_4=1470 Дж/(кг·K), λ_5=60 Вт/(м·K), ρ_5=7850 кг/м^3, c_5=482 Дж/(кг·K), X_1=0,2 м, X_2=0,3 м, X_3=0,35 м, X_4=0,4 м, X_5=0,5 м, X_6=0,505 м, $X_к$=0,510 м, Y_1=0,123 м, Y_2=0,127 м, $Y_к$=0,250 м, Z_1=0,075 м, Z_2=0,123 м, Z_3=0,127 м, Z_4=0,175 м, $Z_к$=0,250 м, $t_{g,ins}$=20 °С, $t_{g,e}$=–40 °С, α_0=8,7 Вт/(м^2·K), α_w=23 Вт/(м^2·K). Сторона поперечного квадратного сечения коннектора бралась равной 4 мм.

Наличие в толще конструкции мало- и высокотеплопроводных включений приводит к искажению температурного поля стены (рис. 2, 3).

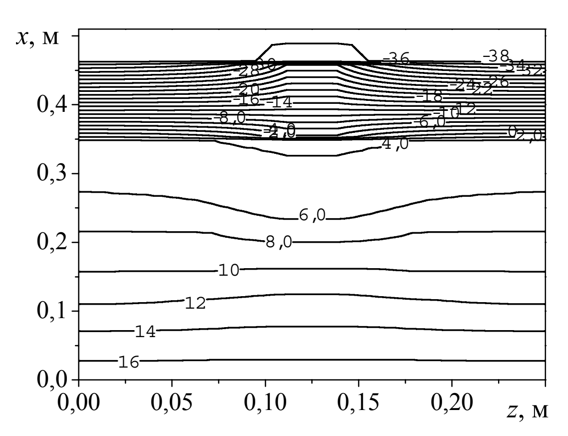


Рис. 2. *Изотермы в поперечном сечении фрагмента $y=Y_к/2$=0,125 м, проходящем через ось коннектора при τ=170 ч; t, °С*

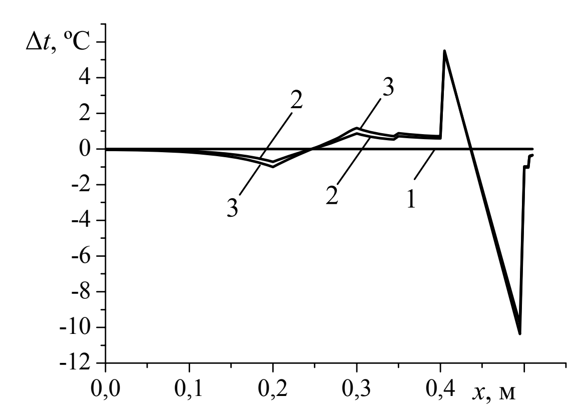


Рис. 3. *Перепад температур $\Delta t=t(x,Y_к/2,Z_к)-t(x,Y_к/2,Z_к/2)$ по толщине утепленного фрагмента в различные моменты времени τ: 1) 0; 2) 2,5; 3) 170 ч*

Как видно из рис. 3, в стационарном режиме теплопередачи в плоскости контакта утеплителя с керамзитобетоном на координате x=0,2 м перепад температур отрицателен и равен примерно –1 °С, а на координате x=0,3 м положителен и составляет приблизительно 1,2 °С. Это говорит о том, что в толще керамзитобетонной конструкции имеется сечение (в данном случае на координате x=0,25 м), до которого теплота от оси фрагмента отводится на его периферию, а после которого, наоборот, подводится с периферии к его оси.

В зоне крепления коннектора в конструктивном слое стены (0,35≤x≤0,4 м) теплота, поступающая от внутренней к наружной поверхности стены, сдерживается теплоизолятором. Это способствует прогреву данной области и наличию положительного и практически постоянного перепада температур, равного примерно 0,7 °С.

В сечениях с координатами x=0,4 и 0,5 м перепад температур составляет примерно 5,4 и –9,8 °С, а характер распределения кривых 2 и 3 в данной области указывает на наличие в центре наружного утепляющего слоя с координатой x≈0,45 м адиабатного сечения, до которого теплота подводится к

коннектору, а после которого, наоборот, отводится от него (рис. 3).

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами работы [8], в которой на основании исследования процесса переноса теплоты через трехслойную кирпичную стену с коннектором показано, что в плоскости контакта утеплителя с кирпичной кладкой зона влияния коннектора, выполненного из арматурной проволоки диаметром 4 мм, на температурное поле стены составляет около 0,06 м.

Величину зоны влияния коннектора на температурное поле неоднородной керамзитобетонной стены можно установить из рис. 4. Как следует из рис. 4, перепад температур поперек коннектора в виду его высокой теплопроводности отсутствует. За пределами коннектора примерно на расстоянии 5...6 см от его поверхности наблюдается резкий рост перепада температур, а затем его плавный выход на асимптоту.

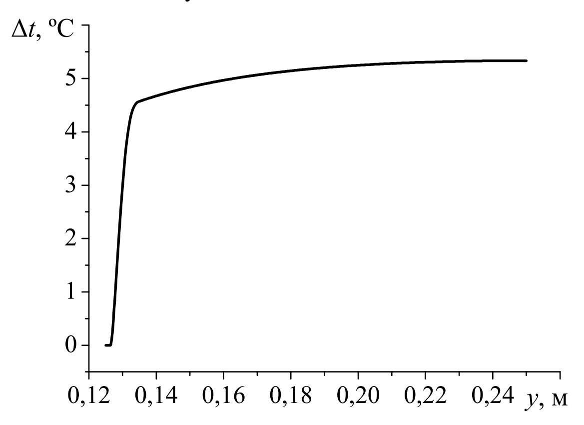


Рис. 4. *Распределение перепада температур* $\Delta t(y)=t(X_4,y,Z_к/2)-t(X_4,Y_к/2,Z_к/2)$ *в момент времени* τ=170 *ч*

С учетом установленных закономерностей формирования температурных полей определены тепловые потери через исследуемый фрагмент стены (рис. 5).

В соответствии со СНиП II-3-79* «Строительная теплотехника» теплотехнический расчет наружных стен зданий с гибкими связями производится с использованием коэффициентов теплотехнической однородности, представляющих собой отношение тепловых потерь через стену без теплопроводных включений к тепловым потерям через стену с теплопроводными включениями. Однако в нормативном документе отсутствуют данные по значениям этих коэффициентов для гибких связей диаметром 4 мм и плотности керамзитобетона, равной 1800 кг/м^3.

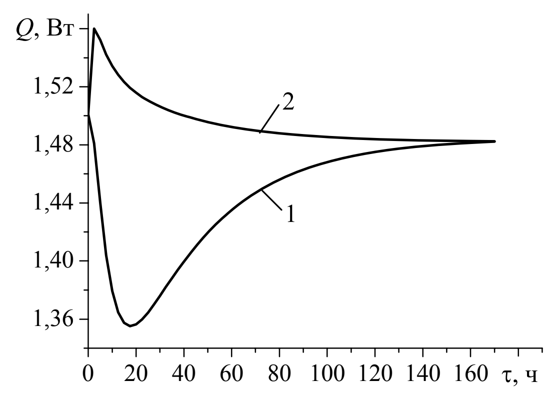


Рис. 5. *Тепловые потоки через: 1) внутреннюю и 2) наружную поверхности утепленного фрагмента стены*

Для рассматриваемого в работе фрагмента стены с коннектором тепловые потери в стационарном режиме теплопередачи составили 1,48 Вт (рис. 5), без коннектора – 1,44 Вт. Значение коэффициента теплотехнической однородности имеет достаточно высокое значение [9], равное 0,97.

Таким образом, проведенное численное исследование тепловых режимов неоднородной керамзитобетонной стены с коннектором позволило выявить в ней закономерности распределения перепадов температур и оценить зону влияния теплопроводного включения. Разработанная численная методика позволяет прогнозировать тепловое состояние наружных неоднородных керамзитобетонных стен с различными теплофизическими и геометрическими характеристиками ее материалов в холодных климатических условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-5186.2006.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарин О.Д., Барвинский С.Ю., Анисимов А.И., Садикова И.Р. К вопросу оценки эффективности энергосберегающих мероприятий в условиях рыночной экономики // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: Матер. Междунар. научно-техн. конф. / Под ред. В.И. Прохорова, Ю.Я. Кувшинова, Л.М. Махова. – 23–25 ноября 2005 г. – М.: МГСУ, 2005. – С. 25–28.
2. Пат. 49067 РФ. МПК^7 E04G 11/08. Монолитная бетонная стена / А.Н. Хуторной, А.В. Колесникова, Н.А. Цветков, А.Я. Кузин. Приор. 14.03.2005. Зарег. 10.11.2005. Бюл. № 31. – 1 с.: 1 ил.
3. Хуторной А.Н., Колесникова А.В. Теплозащитные свойства неоднородных керамзитобетонных наружных стен зданий // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 7. – С. 18–20.
4. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 29 с.
5. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 195 с.
6. Гришин А.М., Берцун В.Н. Итерационно-интерполяционный метод и теория сплайнов // Доклады АН СССР. – 1974. – Т. 214. – № 4. – С. 751–754.
7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1970. – 376 с.
8. Хуторной А.Н., Цветков Н.А., Кузин А.Я., Колесникова А.В. Теплоперенос в плоской трехслойной системе с поперечным несквозным включением // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. – № 2. – С. 29–35.
9. Кувшинов Ю.Я. Малявина Е.Г. Коэффициенты теплотехнической однородности современных наружных стен со стержневыми теплопроводными включениями // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 8. – С. 90–94.